تخریب خمشی جاذب‌های انرژی جدار نازک و ارائهٔ مدل ساده‌شدهٔ عددی*

(یادداشت پژوهشی)

احمد رحمتی علایی[۱] محسن غضنفری[۲] مجید شهروی[۳]

چکیده سیستم‌های جذب انرژی ضربه در صنایع مختلف به‌ویژه در صنایع خودروسازی و ریلی به‌عنوان راه‌حلی برای کم کردن اثر ضربهٔ وارد به سرنشینان و بالا بردن ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مقاله بر روی رفتار تخریب خمشی جاذب‌های انرژی جدار نازک با مقاطع دایروی و مربعی تمرکز می‌کند. تئوری به‌کار گرفته‌شده در آن تعادل انرژی کل است. مود متداول تخریب خمش جهت استخراج روابط، مد نظر می‌باشد. به همین منظور روابط به‌دست آمده با نتایج منتشرشده برای مقاومت خمشی سازه‌های لوله‌ای جدار نازک شامل مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه شده‌اند. در ادامه با استفاده از رابطهٔ مقاومت خمشی استخراج‌شده، مدل‌های ساده‌شده برای لوله‌های دایروی و مربعی معرفی می‌گردند. مزیت اصلی مدل‌های ساده‌شده به‌عنوان یک تکنیک مدل‌سازی بحرانی، کاهش چشمگیر در زمان محاسبات رایانه در مراحل اولیهٔ طراحی با ارائهٔ نتایج نزدیک به مدل اصلی است. بدین منظور با شبیه‌سازی ضربهٔ محوری لولهٔ دارای خم با کمک نرم‌افزار المان محدود دینامیکی غیرخطی *LS-DYNA* نتایج به‌دست آمده مقایسه گردیده‌اند، تا دقت مدل ساده‌شده و هم‌چنین رابطه مقاومت خمشی استخراج‌شده صحت‌سنجی گردد.

واژه‌های کلیدی جاذب انرژی، دایروی-مربعی، ضربه، تخریب خمشی، مدل ساده‌شده.

Bending Collapse of Thin Walled Energy Absorber and Presenting Numerical Simplified Model

A. Rahmati M. Ghazanfari M. Shahravi

Abstract Impact energy absorption systems in various industries such as automotive and railway have a particular importance to minimize the impact on passengers and enhance vehicle safety. This paper focuses on the bending collapse behavior of thin-walled energy absorber with circular and square cross sections. The theory that is applied is global energy equilibrium and the prevalent bending collapse mode for obtaining the relationship is considered. On the same basis, obtained relations are compared with the published results for the bending strength of tubular structures which were derived from experimental and analytical studies. Subsequently by using the derived bending strength formula, simplified models for circular and square tubes is introduced. The main advantage of these simplified models as a critical modeling technique is dramatically reducing the time of computer simulation in early design stages with the results close to the original model. For this purpose, by axial crash simulation of curved tube by using nonlinear dynamic finite element software LS-DYNA, the results are compared to verify the efficiency of the proposed simplified model and the accuracy of the derived relationship for tube's bending strength.

Key Words Energy absorber, Circular-square, Crash, Bending collapse, Simplified model.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۲/٤/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۰/۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک (ماشین‌های ریلی)، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک (ماشین‌های ریلی)، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

(۳) نویسندهٔ مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران. m_shahravi@iust.ac.ir

مقدمه

سازه‌های جدار نازک به‌طور گسترده در صنایع متعدد مهندسی به‌ویژه صنعت خودرو و ریلی به‌عنوان جاذب‌های انرژی استفاده می‌شوند. از جمله این کاربردها می‌توان به جذب انرژی ضربهٔ ناشی از حوادث رانندگی اشاره کرد. لوله‌های جدار نازک به‌خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا، طول لهیدگی زیاد و نسبت جذب انرژی به وزن بالا به‌عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی کاربرد روزافزونی پیدا کرده‌اند. تاکنون مطالعات انجام‌شده برای افزایش کارایی جذب انرژی، ایمنی و قابلیت اطمینان آن‌ها در برابر رفتار ضربه مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. این مقاله نیز بر روی یک جاذب انرژی S شکل که می‌توان آن را به‌عنوان شکل ساده‌ای از انتهای جلوی سر شاسی خودرو در نظر گرفت، تمرکز می‌کند. در اینجا با استفاده از روش تعادل انرژی، روابط بین نیروها و کاهش طول محوری در فشردگی و هم‌چنین رابطهٔ ممان اعمال‌شده و زاویهٔ چرخش در ضربهٔ خمشی به‌دست آمده است. لازم به ذکر است مطالعات قبلی معادلات ریاضی متعددی را برای شرح و پیش‌بینی ارتباط انواع سازه‌های جدار نازک توسعه داده‌اند. این معادلات در پیش‌بینی رفتار ضربهٔ این‌گونه از سازه‌ها اهمیت بسیاری دارند. ایدهٔ این تحقیق نیز بر این اصل تأکید می‌کند که معادلات مربوط می‌توانند جهت معرفی مدل‌های ساده‌شده برای سازه‌های جدار نازک استفاده شوند و هم‌چنین قابلیت جایگزینی با مدل‌های دقیق در تحلیل‌های ضربه را دارا هستند. مزیت اصلی مدل‌های ساده‌شده کاهش زمان تحلیل در رایانه با ارائه نتایج نزدیک به مدل اصلی است.

لیو و دی [1] مشخصات خمشی تیرهای جدار نازک با مقطع کانالی شکل C را توسعه دادند. هم‌چنین ککمن [4]، ویرزبیکی و همکارانش [5-6] معادلاتی را توسعه دادند که مقاومت خمشی و محوری تیرهای جدار نازک را با مقطع قوطی شکل پیش‌بینی می‌نماید.

علاوه بر این سازه‌ها، لوله‌های دایروی جدار نازک سازه‌های مهمی هستند که به‌طور گسترده در صنایع خودروسازی در طراحی وسایل سبک‌وزن استفاده می‌شوند. تاکنون ضربهٔ محوری لوله‌های دایروی جدار نازک به‌طور کامل بررسی و به‌صورت آزمایشگاهی و تحلیلی با تئوری‌های مناسب شرح داده شده‌اند.

آبراموویچ و همکارانش [7] رفتار ضربهٔ محوری لوله‌های دایروی را بررسی نمودند که شامل اثر سرعت ضربه و مشخصه‌های جذب انرژی این لوله‌ها هست. در کار آن‌ها معادلات مهمی استخراج گردید که بر پایهٔ روش‌های عددی و تأییدشده با آزمایش هستند. علاوه بر این مورد، ژنگ و همکارانش [8] پاسخ ممان–زاویه را برای سازه‌های لوله‌ای از طریق بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به‌دست آوردند.

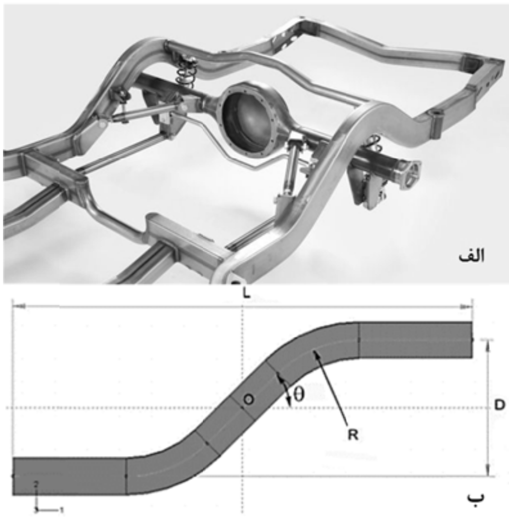
در این مقاله، مکانیزم تخریب خمشی لولهٔ جدار نازک بررسی شده است و بر پایهٔ آن پاسخ ممان–زاویه از طریق روش تعادل انرژی استخراج گردیده است. در ادامه، یافته‌های این تحقیق با نتایج ژنگ برای صحت‌سنجی مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است مدل ساده‌شده نیز یک تکنیک مدل‌سازی بحرانی است که می‌تواند به‌طور مستقیم در مراحل اولیهٔ طراحی برای ارزیابی تحلیل‌های ضربه و شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

مدل ساده‌شده، یک مدل اجزای محدود می‌باشد که شامل المان‌های تیر و فنر است که در قیاس با مدل دقیق به‌کار و زمان کمتری برای تحلیل نیاز دارد. ضمناً می‌تواند به‌عنوان پاسخ مناسب برای شبیه‌سازی سریع و کارآمد کامپیوتری در نظر گرفته شود [1]. در این مدل از رابطهٔ ممان–زاویهٔ به‌دست آمده از روش تعادل انرژی استفاده شده است تا در آن المان‌های فنر غیرخطی تعریف گردد و رفتار ضربه برای خطوط پلاستیک محوری شبیه‌سازی شود [10]. نتایج مقایسه تطابق مناسبی را بین مدل ساده‌شده و مدل دقیق نشان می‌دهد، لذا صحت رابطهٔ ممان–زاویهٔ استخراج‌شده

برای لوله جدار نازک تأیید می‌گردد.

جاذب انرژی S شکل

شکل (۱-الف) نمایی از شاسی یک خودرو را نشان می‌دهد. بسیاری از قطعات شاسی و بدنهٔ خودروها از سازه‌های جدار نازک فولادی تشکیل شده‌اند. مطابق شکل (۱-ب) سازه جدار نازک S شکل را می‌توان به‌عنوان یک نمونهٔ ساده‌شده از نردهٔ پایین قسمت جلوی شاسی خودرو در نظر گرفت [2, 11].



شکل ۱ جاذب انرژی S شکل (الف) شاسی خودرو (ب) مدل ساده‌شده برای نردهٔ پایین و جلوی شاسی خودرو

مکانیزم تخریب خمشی

در این بخش روابط ممان-زاویه برای لوله‌های جدار نازک با به‌کارگیری روش تعادل انرژی کل استخراج می‌شود. مود تخریب متداول این لوله‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. این مود از نتایج شبیه‌سازی عددی لولهٔ استوانه‌ای با تکیه‌گاه ساده در معرض تخریب خمش سه نقطه‌ای پیش‌بینی و نیز از طریق آزمایش‌های خمش تأیید شده است [9]. لازم به ذکر است اگرچه در این شکل مود تخریب خمش سه نقطه مد نظر است اما هم‌چنان می‌تواند با مود تخریب ضربهٔ محوری تطبیق داده شود [9] و این فرض با مقایسهٔ شکل تغییریافته برای مدل لوله‌های دایروی جدار نازک بعد از تست ضربهٔ محوری و خمش سه‌نقطه تأیید می‌گردد (شکل ۳).

در حین استخراج روابط، فرض شده است که کل کار انجام‌شده به‌وسیلهٔ نیروهای خارجی توسط سازه جذب گردد و به‌کار خارجی تبدیل شود. بر اساس روش کار مجازی، انرژی درونی در طول ٦ خط گذرندهٔ محوری توزیع می‌گردد (خطوط ۱ تا ٦ در شکل ۲) که برابر با حاصل‌ضرب ممان خمشی بر واحد طول (M_0) در اندازهٔ هر کدام از خطوط محوری است.

بر پایه فرض‌های بالا رابطهٔ ممان $M(\theta)$ می‌تواند طبق فرمول‌های زیر محاسبه شود. از روابط هندسی نشان داده‌شده در شکل (۲) می‌توان دریافت:

$$\delta = 2H(1 - \cos\alpha) \qquad (۱)$$

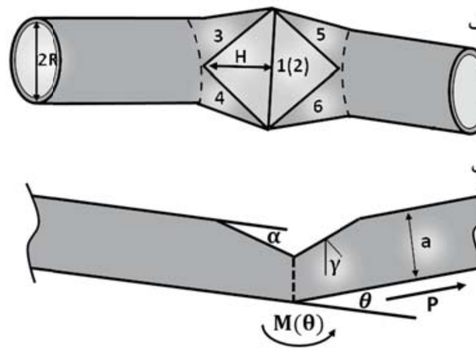
که δ کاهش طول محوری مربوط به تاشدگی پلاستیک، H نصف طول تاشدگی و α زاویهٔ تاشدگی است. بر پایهٔ تعادل انرژی در حین ضربه، نرخ انرژی درونی جذب‌شده با مکانیزم تخریب بایستی برابر با نرخ کار انجام‌شده توسط نیروهای خارجی باشد. بنابراین:

$$E_{ext} = E_{int} \Longrightarrow \dot{E}_{ext} = \dot{E}_{int} \qquad (۲)$$

بر پایهٔ قانون کار مجازی، نرخ کار نیروی خارجی می‌تواند به‌صورت حاصل‌ضرب نیروی لحظه‌ای و سرعت نسبی متناظر با مکانیزم کوتاه‌شدگی محوری بیان شود. بنابراین کار در واحد زمان برای نیروی خارجی برابر خواهد بود با:

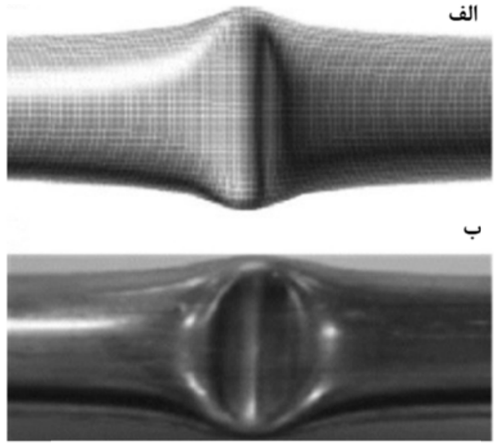
$$\dot{E}_{ext} = P\dot{\delta} = 2PH\sin\alpha\,\dot{\alpha} \qquad (۳)$$

الف
ب



شکل ۲ مکانیزم تخریب لولهٔ دایروی (الف) نمای صفحه‌ای (ب) نمای برش خورده، نیروی لحظه‌ای P و ممان M(θ)

الف
ب



شکل ۳ مود تخریب از شبیه‌سازی کامپیوتری (الف) ضربهٔ محوری (ب) خمش سه نقطه‌ای [3]

نیروی P همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است نیروی ضربهٔ ایجادشده حاصل از برخورد لوله جدار نازک با دیوار صلب است که در قسمت بعد به‌صورت عبارتی از شعاع متوسط لوله، ضخامت t و زاویهٔ خمش لحظه‌ای θ معرفی می‌گردد. از شکل (۲) مشاهده می‌گردد که تاشدگی در این شش خط محوری رخ می‌دهد، لذا فرض می‌شود در حین ضربه، انرژی درونی در طول ٦ خط محوری (۱ تا ٦) توزیع گردد و هم‌چنین به‌دلیل مکانیزم متقارن، انرژی درونی به‌طور مساوی بین خطوط ۱ تا ٦ تقسیم می‌گردد. بنابراین نرخ کل انرژی جذب‌شده برابر است با:

$$\dot{E}_{int} = \sum_{i=1}^{6} \dot{E}_i = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + 4\dot{E}_3 \qquad (٤)$$

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود طول خطوط محوری ۱ و ۲ برابر با نصف محیط دایره یعنی (πR) و طول خطوط ۳ تا ٦، $\sqrt{\frac{(\pi R)^2}{4} + H^2}$ محاسبه می‌شود. بنابراین نرخ چرخش خط محوری ۱ برابر با نرخ خمش H (یعنی $\dot{\alpha}$) است. از شکل مشابه نتیجه می‌گردد که نرخ چرخش خط محوری ۲ برابر با $\dot{\theta}$ است. خطوط محوری ۳ تا ٦ نیز با زاویهٔ متفاوتی نسبت به خطوط ۱ و۲ چرخش دارند. در روابط ذیل این چرخش با زاویهٔ $\dot{\gamma}$ نشان داده شده است. (شکل ٤)

مطابق جدول (۱) نرخ انرژی توزیع‌شده در طول خطوط محوری برابر است با:

$$\dot{E}_1 = M_0 \pi R \dot{\alpha} \qquad (۵)$$

$$\dot{E}_2 = M_0 \pi R \dot{\theta} \qquad (٦)$$

$$\dot{E}_3 = M_0 \sqrt{\frac{(\pi R)^2}{4} + H^2}\,\dot{\gamma} \qquad (۷)$$

جدول ۱ خطوط محوری در مود تخریب لوله جدار نازک

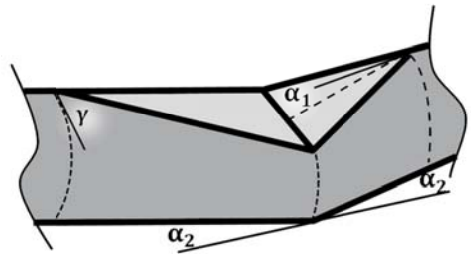
خط محوری	نرخ زاویه چرخش	اندازه
خط ۱	$\dot{\alpha}$	πR
خط ۲	$\dot{\theta}$	πR
خط ۳ الی ٦	$\dot{\gamma}$	$\sqrt{\frac{(\pi R)^2}{4} + H^2}$

از شکل (۵) استنباط می‌شود که: $\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\frac{\delta}{2}}{a} = \frac{H(1-\cos(\alpha))}{a}$. پارامتر a عرض معادل سطح مقطع مربعی برای سطح مقطع دایروی است. از بررسی‌های قبلی در مرجع [8] در مورد سازه‌های جدار نازک می‌توان دریافت که مشخصه‌های حل برای مقاطع مربعی و دایروی بسیار شبیه هم هستند. بنابراین هر لولهٔ دایروی می‌تواند با استفاده از لولهٔ مربعی معادل، تقریب زده شود. مطابق مرجع [8] عرض معادل لوله

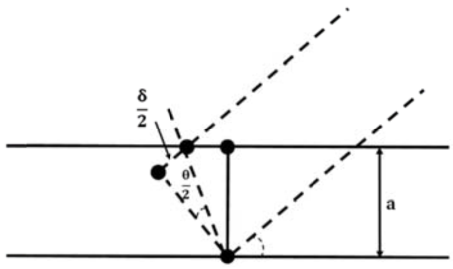
مربعی با روش تحلیلی، R ۱/٦۳ محاسبه و تأیید شده است که با این مقدار ممان اول سطح مقطع دایروی و مربعی یکسان است. برای مقادیر کوچک زوایای α و θ رابطهٔ زیر می‌تواند با استفاده از بسط تیلور نوشته شود:

$$\left(\frac{\theta}{2}\right)=\frac{\frac{\delta}{2}}{a}=\frac{H(1-\cos(\alpha))}{a}=\frac{H\left(1-\left(1-\frac{\alpha^2}{2}\right)\right)}{a}$$

$$\Rightarrow \theta=\frac{H}{a}\alpha^2 \Rightarrow \alpha=\left(\frac{a\theta}{H}\right)^{0.5} \quad (۸)$$



شکل ٤ زاویهٔ چرخش γ برای خطوط محوری ۳ تا ٦



شکل ٥ رابطه بین α و θ

زاویهٔ γ با رابطهٔ $\tan(\gamma)=\left(\frac{\tan(\frac{\theta}{2})}{\sin(\alpha)}\right)$ به α و θ مرتبط می‌شود.

$$\gamma=\frac{(\theta/2)}{\alpha}=\frac{1}{2}\frac{H}{a}\alpha \Rightarrow \gamma=\frac{1}{2}\left(\frac{H\theta}{a}\right)^{0.5} \quad (۹)$$

از جای‌گذاری رابطهٔ (۹ و ۸) در روابط (۷-٤) رابطهٔ (۱۰) به‌دست می‌آید:

$$\dot{E}_{int}=M_0\dot{\alpha}\left(\pi R+\frac{2\pi\alpha H}{1.63}+\sqrt{\left(\frac{\pi^2R^2}{4}+H^2\right)}\left(\frac{H}{1.63R}\right)\right) \quad (۱۰)$$

جای‌گذاری رابطهٔ (۱۰ و ۳) در رابطهٔ (۲) و با فرض زاویهٔ کوچک α نیروی لحظه‌ای P می‌تواند طبق رابطهٔ زیر محاسبه شود:

$$P=M_0\left(\frac{\pi R}{2H\alpha}+\frac{\pi}{1.63}+\sqrt{\left(\frac{\pi^2R^2}{4}+H^2\right)\left(\frac{H}{1.63R\alpha}\right)}\right) \quad (۱۱)$$

طبق بررسی‌های ژنگ[8]:

$$H=1.84R(t/2R)^{0.5} \quad (۱۲)$$

که t ضخامت لوله است. رابطهٔ (۱۲) یک پاسخ تحلیلی برای قسمت تاشدهٔ لولهٔ دایروی است که با مینیمم کردن انرژی جذب‌شده نسبت به H به‌دست آمده است. این معادله براساس مدل پلاستیک و رابطهٔ ضخامت لوله ($\frac{R}{t}$<30) توسعه داده‌شده که در محدودهٔ پلاستیک تغییر شکل داده است. با جای‌گذاری رابطهٔ (۱۲ و ۸) در رابطهٔ (۱۱) رابطهٔ بین نیروی لحظه‌ای P و زاویه θ به‌دست می‌آید:

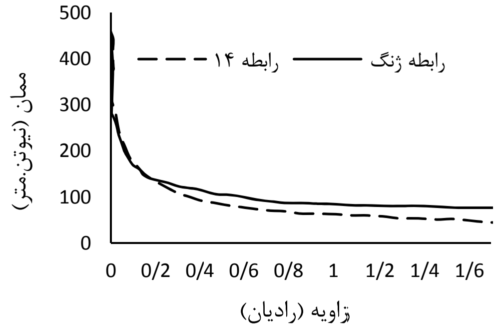
$$P=M_0\left(1.08\left(\frac{R}{t}\right)^{1/4}\left(\frac{1}{\sqrt{\theta}}\right)+1.93+\sqrt{(0.75R+0.51t)}\left(\frac{t^{1/4}}{R^{3/4}}\right)\left(\frac{1}{\theta}\right)\right) \quad (۱۳)$$

از رابطهٔ (۱۳ و ۱۱) مشاهده می‌شود که نیروی لحظه‌ای P در حین تخریب خمش تابعی از زاویهٔ خمش(θ) است. سرانجام M(θ) یعنی ممان خمشی که از نیروی P به‌دست می‌آید، می‌تواند به‌سادگی از رابطهٔ (١٤) برابر با حاصل‌ضرب نیرو در بازو مشخص گردد.

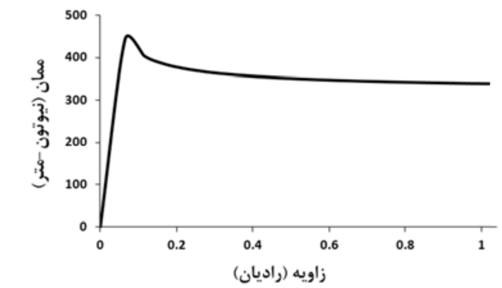
$$M(\theta)=Pa=P(1.63R)=M_0\left(1.76\left(\frac{R^{5/4}}{t^{1/4}}\right)\left(\frac{1}{\sqrt{\theta}}\right)+3.15+\sqrt{(2R+1.36t)}(Rt)^{1/4}\left(\frac{1}{\theta}\right)\right) \quad (١٤)$$

نمودار رابطهٔ (١٤) در شکل (٦) رسم شده است. از این شکل می‌توان دریافت که بایستی رابطهٔ M(θ)

برای زوایای بیشتر از ۰/۲ رادیان استفاده گردد، چرا که با ترسیم رابطهٔ (۱٤) و بزرگ‌نمایی در شکل (۷) مشخص می‌شود که در زوایای کمتر از ۲ رادیان نمودار ممان، صعودی است. بایستی تأکید گردد، در بخش بعدی رابطهٔ (۱٤) به‌منظور مدل‌سازی فنر پیچشی غیرخطی در مدل ساده‌شده لولهٔ جدار نازک که مهم‌ترین قسمت مدل ساده‌شده برای تغییر شکل‌های پلاستیک است، مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



شکل ٦ رابطهٔ ١٤(ممان-زاویه) برای لوله جدار نازک



شکل ۷ نمودار ممان-زاویه خمش ورودی به نرم‌افزار LS-DYNA

اعتبارسنجی

در این قسمت رابطهٔ ممان-زاویهٔ استخراج‌شده (رابطهٔ ۱٤) برای لولهٔ دایروی با مقایسهٔ رابطهٔ ممان-زاویهٔ منتشرشده در مرجع [8] برای سازه‌های لوله‌ای تأیید شده است. ژنگ [8] یک حل تحلیلی (معادلهٔ ۱۵) برای خمش سازه‌های لوله‌ای براساس تئوری خطوط محوری پلاستیک استخراج نموده است که با داده‌های آزمایشگاهی نیز صحت‌سنجی شده‌اند.

$$M(\theta) = 4t^2M_0\left(-\frac{4}{3}+2.6117\left(\frac{R}{t}\right)^{11/12}\left(\frac{1}{\sqrt{\theta}}\right)\right) \quad (۱۵)$$

در معادلات (۱۵ و ۱٤)، M_0 ممان پلاستیک بر واحد طول دیوارهٔ مقطع است که برابر با $(\sigma_0 t^2/4)$ است. ابعاد مدل لولهٔ منحنی شکل دایروی جدار نازک به‌کار گرفته شده، D=50mm و t=1.5mm می‌باشد. منحنی‌های ممان-زاویه برای معادلات (۱۵ و ۱٤) در شکل (٦) رسم شده‌اند. از این شکل می‌توان دریافت که رابطهٔ M(θ) تطابق مناسبی با پاسخ ژنگ [8] دارد.

مدل ساده‌شدهٔ عددی

اکنون معادلهٔ (۱٤) برای مدل ساده به‌کار گرفته می‌شود و از آن برای تحلیل‌های ضربه استفاده خواهد شد. در شبیه‌سازی‌های پیشرو مدل لولهٔ جدار نازک با یک سرعت اولیه به دیوار صلب برخورد می‌کند و تخریب حاصل می‌شود. از مرجع [1] می‌توان دریافت هنگامی‌که تیر جدار نازک بدون خم با دیوار صلب برخورد می‌کند، کمانش محوری رخ می‌دهد و هیچ‌گونه تخریب خمشی ظاهر نمی‌گردد. با این وجود هنگامی که تیر جدار نازک دارای خم با دیوار برخورد کند دچار خمش خواهد شد و تخریب خمشی بر روی خطوط محوری پلاستیک متمرکز می‌شود. بنابراین در اینجا مدل لولهٔ جدار نازک دارای خم با مقطع دایروی و مربعی برای تحلیل ضربه استفاده می‌شود تا تخریب خمشی را نشان دهد.

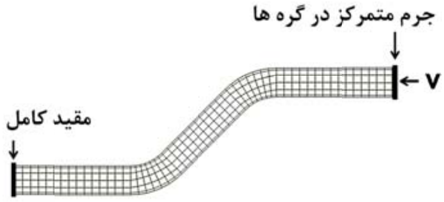
بایستی تأکید گردد که اگرچه معادلهٔ (۱٤) برای لوله‌های بدون خم استخراج شده است، ولی با این وجود هم‌چنان می‌تواند برای لوله‌های دارای خم نیز استفاده شود؛ زیرا لوله‌های دارای خم در ضربهٔ محوری و بدون خم در خمش سه‌نقطه‌ای، مکانیزم تخریب

یکسانی از خود نشان می‌دهند [1, 3, 10].

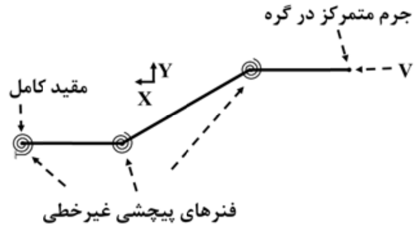
شکل (۸) مدل دقیق شامل المان‌های پوسته‌ای و شکل (۹) مدل ساده‌شده را نشان می‌دهد که از روش مدل‌سازی لیو در مرجع [1] ایجاد شده است. در این مدل از المان‌های فنر چرخشی غیرخطی براساس رابطهٔ (١٤) برای مدل‌سازی خطوط محوری پلاستیک استفاده می‌شود. اساس این مدل ساده‌شده بر فنر پیچشی غیرخطی استوار است که در نقاط حساس مدل قرار می‌گیرد، پس برای تعریف المان فنر چرخشی غیرخطی در LS-DYNA، داده‌های ممان-زاویه مطابق شکل (۷) و رابطهٔ تحلیلی (١٤) به‌کار گرفته شده است. در مدل ساده‌شده گره پایانی تیر دارای خم، با ثابت نگه‌داشتن ٦ درجه آزادی به‌طور کامل مقید و تنها درجه آزادی، جابه‌جایی طولی برای گره ابتدایی آزاد شده است که در آنجا سرعت اولیه لحاظ گردیده است. به‌علاوه چون لولهٔ دارای خم در صفحهٔ دو بعدی تعریف شده است، قیدهای دیگری نیز بایستی به‌منظور جلوگیری از حرکت خارج از صفحه در نظر گرفته شود. ضمناً دو گره مشابه هم در مکان‌های المان فنری تعریف می‌شود. کلیه درجات آزادی آن‌ها به‌جز درجهٔ آزادی چرخشی کوپل شده‌اند. جدول (۲) جزئیات شرایط ضربه و اطلاعات مدل‌های نرم‌افزاری را بیان می‌کند.

جدول۲ مشخصات مواد، هندسه و شرایط ضربه

مدول یانگ	2.1 e11Pa
چگالی	7830 ($^{Kg}/_{m^3}$)
تنش تسلیم	2e8 Pa
مدول سخت شوندگی	6.3e8 Pa
ضریب پواسون	0.3
طول کل	1455 mm
قطر	50 mm
ضخامت	1.5 mm
جرم اضافه‌شده	400 Kg
سرعت اولیه	$15^{m}/_{s}$
زمان ضربه	0.01 sec



شکل ۸ مدل دقیق برای مقطع دایروی و مربعی

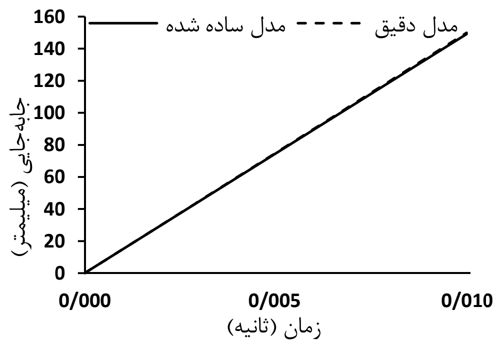


شکل ۹ مدل ساده‌شده برای مقاطع دایروی و مربعی

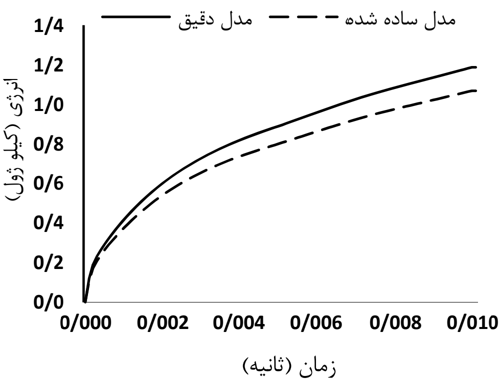
نتایج

در شبیه‌سازی با هیدروکد LS-DYNA، مدل‌ها با یک دیوار صلب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه در مدت زمان ۰/۰۱ ثانیه برخورد می‌کنند. نتایج حاصل‌شده از هر دو مدل در شکل‌های (۱۹-۱۰) و جدول (۳) مقایسه شده‌اند. جدول (۳) نشان می‌دهد که نتایج دینامیکی به‌دست آمده از مدل ساده‌شده با مدل دقیق، درصد اختلاف کمی در پارامترهای جابه‌جایی، نیروی ضربه و انرژی جذب‌شده دارند و تطابق خوبی مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است مقدار پارامتر جابه‌جایی، بسیار نزدیک به مدل دقیق (نزدیک به صفر) به‌دلیل استفاده از المان‌های تیر زیاد و هم‌چنین با درجهٔ تابعِ شکل بالاتر به‌دست آمده است و این خود تأییدی بر صحت مدل ساده‌شده می‌باشد. در ادامه مقایسه‌ای بین مدل ساده‌شده و دقیق برای دو مقطع متفاوت مربعی و دایروی انجام شده است. نتایج مربوط به آن در نمودار میزان جذب انرژی سازه (شکل ۲۰ و ۱۵) آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیش‌ترین میزان جذب انرژی مربوط به مقطع مربعی برای هر دو مدل ساده و

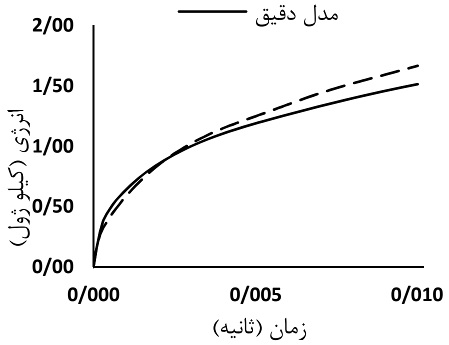
دقیق است. از این طریق می‌توان بسته به اهمیت انرژی جذب‌شده یا نیروی واردشده به سازه به انتخاب مقطع مناسب پرداخت. همان‌طور که از شکل‌های (۱۴-۱۱) مشخص است، اگر در طراحی میزان انرژی جذب‌شده مهم باشد بایستی از جاذب با مقطع مربعی و اگر نیروی واردشده به سازه از اهمیت بیشتری برخوردار باشد بایستی از جاذب با مقطع دایروی استفاده شود. دلیل افزایش نیروی وارد به سازه با مقطع مربعی می‌تواند گوشه‌دار بودن سطح مقطع مربعی و به تبع آن ایجاد تمرکز تنش در سازه باشد. به‌عنوان مثال می‌توان به این موضوع اشاره کرد که جاذب‌های انرژی استفاده‌شده در قطار اکثراً از نوع دایروی و جاذب‌های انرژی استفاده‌شده در شاسی خودرو اکثراً مربعی می‌باشند.



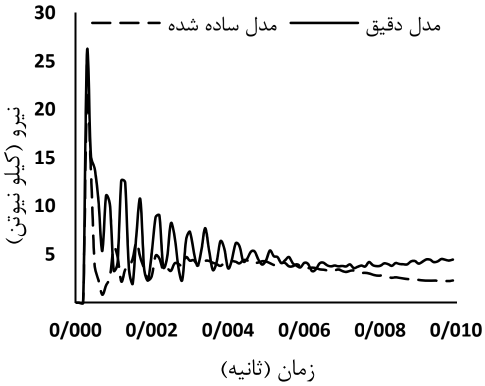
شکل ۱۰ جابه‌جایی کلی مدل‌های ساده‌شده و دقیق دایروی



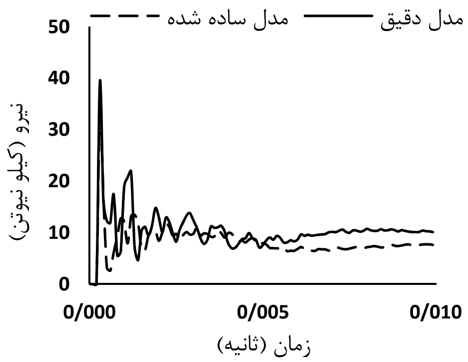
شکل ۱۱ انرژی جذب‌شدهٔ مدل دقیق و ساده‌شدهٔ دایروی



شکل ۱۲ انرژی جذب‌شدهٔ مدل دقیق و ساده‌شدهٔ مربعی

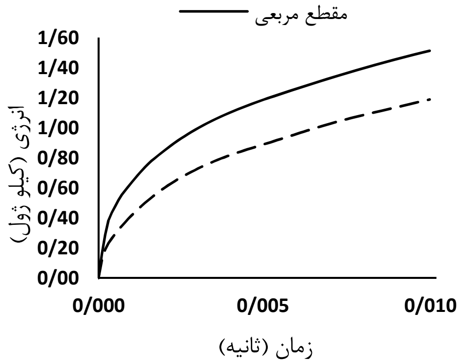


شکل ۱۳ نیروی ضربه برای مدل دقیق و ساده‌شدهٔ دایروی



شکل ۱۴ نیروی ضربه برای مدل دقیق و ساده‌شدهٔ مربعی

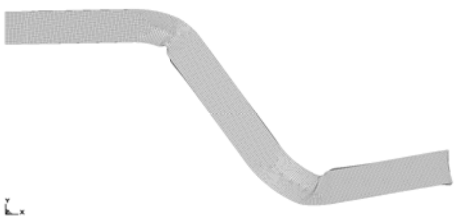
اشکال (۱۹-۱۶) نیز فرم تغییر شکل‌یافته از مدل دقیق و ساده‌شده را نشان می‌دهند که تقریباً ساختار مشابهی بین آن‌ها در هر دو مقطع مربعی و دایروی وجود دارد. در مجموع با بررسی نتایج و نزدیک بودن نتایج مدل ساده‌شده با مدل دقیق، صحت رابطهٔ (۱۴) و نیز روش مدل‌سازی تأیید می‌شود.



شکل ۱۵ انرژی جذب‌شدهٔ مدل‌های دقیق دایروی و مربعی



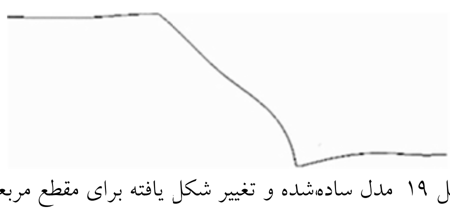
شکل ۱۶ مدل دقیق تغییر شکل یافته برای مقطع دایروی



شکل ۱۷ مدل دقیق تغییر شکل یافته برای مقطع مربعی



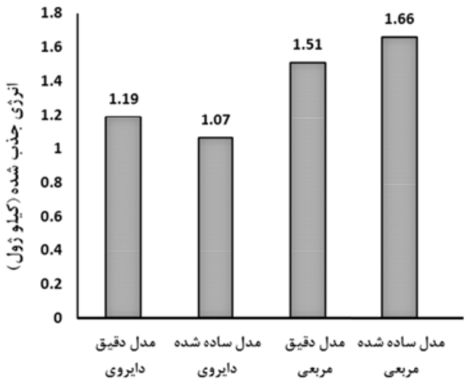
شکل ۱۸ مدل ساده‌شده و تغییر شکل یافته برای مقطع دایروی



شکل ۱۹ مدل ساده‌شده و تغییر شکل یافته برای مقطع مربعی

جدول ۳ مقایسهٔ نتایج حاصل از مدل دقیق و ساده‌شده برای مقاطع دایروی و مربعی

	مدل دقیق دایره	مدل ساده دایره	درصد اختلاف (٪)	مدل دقیق مربع	مدل ساده مربع	درصد اختلاف (٪)
جابه‌جایی (mm)	۱۴۹	۱۴۸/۸	۰/۱۳	۱۴۹	۱۴۸/۹	۰/۰۶
نیروی ضربه (kN)	۲۵/۹	۲۱/۵	۱۶/۹	۳۹/۳	۳۴/٤	۱۲/۵
انرژی جذب‌شده (kJ)	۱/۱۹	۱/۰۷	۱۰	۱/۵۱	۱/٦٦	−۹/۹



شکل ۲۰ مقایسهٔ انرژی جذب‌شده

نتیجه‌گیری

این مقاله تخریب خمشی لوله‌های جدار نازک را به‌دلیل کاربرد فراوان در صنایع خودرو و ریلی با ارائهٔ مدل ساده‌شدهٔ عددی بررسی می‌نماید. با شبیه‌سازی ضربهٔ محوری و مقایسه نتایج و تئوری‌های منتشرشده صحت رابطهٔ (١٤) برای پیش‌بینی رفتار ضربهٔ لوله های جدار نازک تأیید شده است که قابل کاربرد برای تخصیص المان‌های فنر چرخشی غیرخطی به مدل ساده‌شده می‌باشد. هم‌چنین مقایسه‌ای بین لوله‌های جدار نازک با مقاطع دایروی و مربعی صورت گرفته است تا بتوان از این مسیر برای بعضی از قطعات

شاسی خودرو با توجه به اهمیت انرژی جذب‌شده یا نیروی وارد به سازه انتخاب صحیحی صورت پذیرد. انتخاب نوع مقطع می‌تواند برای مثال در هنگام برخورد خودرو با موانع برای اتومبیل و سرنشینان بسیار مهم باشد. در انتها با مقایسهٔ نتایج مربوط به مدل دقیق و مدل ساده‌شده مشاهده می گردد که درصد انحراف نتایج در پارامترهای جابه‌جایی، نیروی ضربه و انرژی جذب‌شده ناچیز است، لذا از این تکنیک مدل‌سازی بحرانی که در مراحل اولیهٔ طراحی برای ارزیابی تحلیل‌های ضربه و شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده می‌شود، می‌توان به‌منظور کاهش زمان محاسبات و صرفه‌جویی در منابع بهره برد.

مراجع

1. Liu YC, Day ML. "Simplified modelling of thin walled box section beam", *I.J. Crash*, Vol. 11, No. 3, pp. 263–272, (2006).
2. Hamza K, Saitou K, "Design optimization of vehicle structures for crashworthiness using equivalent mechanism approximations", *Journal of Mechanical Design*, pp. 127 / 485, (2005).
3. Liu, Y.C., "Development of simplified models for crashworthiness analysis", PhD thesis, Louisville, University of Louisville, (2005).
4. Wierzbicki, T., Recke, L., Abramowicz, W. and Gholami, T., "Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crush loading", *I. Compression. ComputStruct*, pp. 51(6):611–23. (1994).
5. Wierzbicki, T., Recke, L., Abramowicz, W., Gholami, T. and Huang, J., "Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crush loading"*—II. Bending. Comput. Struct.*, pp. 51(6): 623–41, (1994).
6. Kecman, D., "Bending collapse of rectangular and square section tubes", *Int. J. MechSci*, pp. 25 (9–10) 623–36, (1983).
7. Abramowicz, W., "Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams", *RozprInzEng Trans*, pp. 29(1):5–26, (1981).
8. Zheng, L. and Wierzbicki, T., "Quasi-static crushing of S-shaped aluminum front rail", *Int. J. crashworthiness*, pp. 9(2):155–73, (2004).
9. Mamalis, A., Manolakos, D., Loannidis M. and Kostazos, P., "Bending of cylindrical steel tubes: numerical modeling", *Int. J. Crashworthiness*, pp. 11(1):37–47, (2006).
10. Kim, HS, Kang, SY, Lee, IH, Park, SH. and Han, D.C. "Vehicle frontal crashworthiness analysis by simplified structure modeling using nonlinear spring and beam elements", *Int. J. crashworthiness*, pp. 2(1):107–17, (1996).

۱۱. خلخالی، ابوالفضل، درویزه، ابوالفضل، نریمان زاده، نادر و معصومی،ابوالفضل.، «تحلیل تئوریک تغییر شکل‌های بزرگ در جاذب‌های انرژی S شکل»، هفدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، (۱۳۸۸).